

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО Удмуртский государственный университет
Институт гражданской защиты

Оценка огнестойкости зданий и сооружений
Учебно - методическое пособие

Издательство «Удмуртский университет»
Ижевск 2015

УДК 624.01(075.8)
ББК 38.5 - 021.1я73
О - 931

Рецензент: Заведующий кафедрой «Защиты в чрезвычайных ситуациях и управления рисками» к.т.н.,
доцент С.В. Широбоков

Составители:
А.А. Иванов, С.В. Метлушин

О - 931 Оценка огнестойкости зданий и сооружений: учеб.
метод. пособие / сост. А.А. Иванов, С.В. Метлушин.
Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2015. - 42 с.

В учебно-методическом пособии изложены методы и способы оценки огнестойкости зданий и сооружений, приведены примеры решения задач, даны варианты заданий для самостоятельной подготовки. Пособие предназначено для студентов специальности СПО 20.02.04 «Пожарная безопасность» и специальности ВО 20.05.01 «Пожарная безопасность».

УДК 624.01(075.8)
ББК 38.5 - 021.1я73

© Сост. Иванов А.А., Метлушин С.В. 2015

© ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет», 2015

Содержание

Предисловие	4
Введение	5
1. Огнестойкость строительных конструкций	5
2. Расчет предельных состояний строительных конструкций	6
2.1 Расчет пределов огнестойкости древесных конструкций	6
2.3 Предел огнестойкости железобетонных конструкций	19
2.4 Расчет огнестойкости железобетонных конструкций.	32
Список используемой литературы	41

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемые студенты! Это пособие создано для Вас в помощь изучения особенностей и принципов расчетов предельных состояний строительных конструкций.

Актуальность разработки учебно-методического пособия определяется тем фактом, что умение производить расчеты на огнестойкость зданий и сооружений является неотъемлемой частью предупреждения возникновения пожаров. В ходе изучения Вами дисциплины «Здания и сооружения», в соответствии с ФГОС-3 и учебным планом по подготовке специалистов по специальности СПО 20.02.04 «Пожарная безопасность» и специальности ВО 20.05.01 «Пожарная безопасность», рассматриваются принципы расчета древесных, металлических и железобетонных конструкций по несущей способности.

Структура пособия. Пособие включает в себя 2 раздела: Огнестойкость строительных конструкций; Расчет предельных состояний строительных конструкций.

Особенностью данного пособия является сочетание богатого теоретического и графического материала.

При подготовке пособия составителем использована действующая нормативная база.

Преподаватели ИГЗ желают всем студентам успешного освоения компетенций по дисциплине «Здания и сооружения», творческих успехов и достижений!

Введение

В современном мире пожары ежегодно уносят десятки тысяч человеческих жизней, наносят ущерб в сотни миллионов долларов. Противостоять этому возможно в первую очередь, проводя работы по предупреждению пожаров на этапе проектирования и строительства зданий и сооружений.

Исходя из выше изложенного, в соответствии с Федеральным законом №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и сводом правил 64.13330-2011 «Деревянные конструкции» было составлено данное пособие. Описанная в пособии методика по расчету огнестойкости несущих конструкций будет полезна будущим специалистам по пожарной безопасности, так как в своей профессиональной деятельности им необходимо решать спектр различных задач, которые неразрывно связаны с большим количеством вычислений.

1. Огнестойкость строительных конструкций

Рассмотрим классификацию строительных конструкций по огнестойкости прописанные в статье 35 ФЗ №123-ФЗ [1]

Пределы огнестойкости строительных конструкций определяются в условиях стандартных испытаний. Наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций в условиях стандартных испытаний или в результате расчетов устанавливается по времени достижения одного или последовательно нескольких из следующих признаков предельных состояний:

- 1) потеря несущей способности (R);
- 2) потеря целостности (E);
- 3) потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных значений (I) или достижения

предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W).

Предел огнестойкости для заполнения проемов в противопожарных преградах наступает при потере целостности (E), теплоизолирующей способности (I), достижении предельной величины плотности теплового потока (W) и (или) дымогазонепроницаемости (S).

2. Расчет предельных состояний строительных конструкций

2.1 Расчет пределов огнестойкости деревянных конструкций

Примечание: Приведенные ниже методы расчета пределов огнестойкости несущих деревянных конструкций относятся к случаю воздействия стандартного режима пожара и не распространяются на элементы каркаса панелей ограждений, выполненных из древесины; на конструкции, несущими элементами которых являются фанера, древесно-волоконистые и древесно-стружечные плиты.

Рекомендуемый метод расчета несущих деревянных конструкций на огнестойкость основан на следующих допущениях:

- обугливание древесины конструкции, после ее воспламенения при пожаре, происходит с постоянной скоростью;
- свойства древесины необуглившейся (рабочей) части сечения конструкции одинаковы по всей площади.

В общем случае для расчета предела огнестойкости деревянных конструкций необходимо решение двух задач: теплотехнической и прочностной.

Решение теплотехнической задачи огнестойкости, применительно к деревянным конструкциям, заключается:

- в определении времени t_f – от начала огневого воздействия до воспламенения древесины конструкции;
- в определении изменения рабочего сечения деревянной конструкции после воспламенения древесины при пожаре, за счет процесса ее обугливания.

Решение прочностной задачи огнестойкости, применительно к деревянным конструкциям заключается:

- в определении изменения соответствующих напряжений в расчетных сечениях конструкций от нормативных нагрузок в зависимости от изменения размеров рабочих сечений деревянной конструкции за счет обугливания древесины после ее воспламенения при пожаре;

- в проверке условий прочности деревянной конструкции на воздействие соответствующих нормативных нагрузок, с учетом изменения напряжений от этих нормативных нагрузок в зависимости от времени горения древесины; и определения времени t_r – от начала воспламенения древесины до утраты конструкцией несущей способности, т.е. времени, при котором из-за выгорания сечения конструкция уже будет более не способна выдерживать приложенную к ней нагрузку.

Предел огнестойкости несущих деревянных конструкций определяется выражением:

$$\tau_{f.r}(R) = \tau_f + \tau_r \quad (1),$$

где:

τ_f - интервал времени от начала огневого воздействия до его воспламенения (мин);

τ_r - время от начала воспламенения до потери несущей способности (мин).

Прочностные задачи

Расчетные сопротивления различных сортов и пород древесины для различных напряженных состояний деревянных конструкций, используемые для решения прочностной задачи огнестойкости, приведены в табл. 2.1.

Деревянные центрально-растянутые элементы изменение напряжений растяжения:

$$\sigma_{ft}(\tau) = \frac{N_n}{A_n(\tau)}, \quad (2)$$

где N_n - продольная сила от нормативных нагрузок, Н;

$A_n(\tau)$ - площадь поперечного сечения элемента, нетто, в зависимости от времени горения при пожаре τ , м².

Время τ_r от начала воспламенения элемента при пожаре до утраты им несущей способности определяется из условия:

$$\sigma_{ft}(\tau_r) \geq R_p,$$

где R_p - расчетное сопротивление древесины растяжению вдоль волокон.

Таблица 2.1 - Расчетные сопротивления древесины при оценках огнестойкости деревянных конструкций в зависимости от сорта древесины и вида напряженного состояния [3]

Напряженное состояние	Условное обозначение	Расчетные сопротивления для различных сортов древесины, МПа (кг/см ²)		
		1	2	3
Изгиб	R_{fm}	29(290)	26 (260)	18(180)
Сжатие и смятие вдоль волокон	R_{fc}	26(260)	23(230)	16(160)
Растяжение вдоль волокон	R_{ft}	20(200)	15(150)	-
Растяжение поперек волокон	R_{ftt}	1,1(11)	1,1(11)	-
Скалывание вдоль волокон цельной древесины	R_{iqs}	3,7(37)	3,2(32)	2,9(29)
Скалывание вдоль волокон клееной древесины	R_{iq}	1,3(13)	1,2(12)	1,1(11)

Деревянные центрально-сжатые элементы изменение напряжений сжатия $\sigma_{fc}(\tau)$ центрально-сжатых элементов, в зависимости от времени их горения при пожаре следует определять:

а) по прочности из условия:

$$\sigma_{fc}(\tau) = \frac{N_n}{A_n(\tau)}, \quad (3)$$

б) по устойчивости из условия:

$$\sigma_{fc}(\tau) = \frac{N_n}{\varphi(\tau) \cdot A_n(\tau)}, \quad (4)$$

где N_n - продольная сила от нормативных нагрузок, Н;

$A_n(\tau)$ - площадь поперечного сечения элемента, нетто, в зависимости от времени горения при пожаре τ , м².

$\varphi(\tau)$ – коэффициент продольного изгиба, определяемый с учетом изменения рабочего сечения элемента, его длины и гибкости в моменты времени горения [2] (в соответствии с положениями СП 64.13330-2011 «Деревянные конструкции»).

Время τ_r от начала воспламенения элемента при пожаре до утраты им несущей способности определяется из условия:

$$\sigma_{fc}(\tau_r) \geq R_c,$$

где R_c - расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон.

Расчет предела огнестойкости по потере прочности на изгиб по нормальным напряжениям производят по формуле:

$$\sigma_{fm}(\tau) = \frac{M_H}{W_n(\tau)}, \quad (5)$$

где M_H - расчетный изгибающий момент, Нм; $W_n(\tau)$ - расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента (нетто) в зависимости от времени горения конструкции на пожаре, м³.

Расчет предела огнестойкости по потере прочности по скалыванию производят по формуле:

$$\sigma_{fq}(\tau) = \frac{Q_H \cdot S_b(\tau)}{I_b(\tau) \cdot b(\tau)}, \quad (6)$$

где Q_H - поперечная сила в расчетном сечении от нормативных нагрузок, Н;

$S_b(\tau)$ - статический момент инерции брутто сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси, м³;

$I_b(\tau)$ - момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси, м⁴;

$b(\tau)$ - ширина сечения конструкции, в зависимости от времени τ его горения при пожаре, м;

Для элементов прямоугольного сечения значения $\sigma_{fq}(\tau)$ можно определять из выражения:

$$\sigma_{fq}(\tau) = \frac{1,5 \cdot Q_H}{A(\tau)} \quad (7)$$

где $A(\tau)$ - расчетная площадь поперечного сечения, м².

$$A_n(\tau) = b(\tau) \cdot l(\tau) \quad (8)$$

$$b(\tau) = b - 2 \cdot V \cdot \tau, \quad (9)$$

$$l(\tau) = l - 2 \cdot V \cdot \tau, \quad (10)$$

Где: $b(\tau)$ ширина и $l(\tau)$ длина сторон поперечного сечения, м. V скорость обугливания древесины, м/мин.

Таблица 2.2 - Скорость обугливания древесины (ель, сосна) при влажности более 9% при воздействии «стандартного» пожара [3]

Наименьшая сторона сечения элемента, мм	Скорость обугливания древесины, V мм/мин.	
	Клееной	цельной
≥120	0,6	0,8
<120	0,7	1,0

Время τ_r от начала воспламенения древесины элемента при пожаре до утраты им несущей способности определяется из условий:

а) прочности на изгиб

$$\text{если } \sigma_{fm}(\tau) \geq R_H,$$

где R_H - расчетное сопротивление изгибу, Па; то $\tau = \tau_r$;

б) прочности на скалывание

$$\text{если } \sigma_{fq}(\tau) \geq R_{CK},$$

где R_{CK} - расчетное сопротивление скалыванию при изгибе, Па. то $\tau = \tau_r$.

Время от начала теплового воздействия пожара на деревянную конструкцию до начала воспламенения древесины τ_f определяется по табл.2.3, в зависимости от способа огнезащиты конструкции.

Таблица 2.3 - Время от начала теплового воздействия до воспламенения древесины τ_f в зависимости от способа огнезащиты [3]

Способ огнезащиты	Время до воспламенения древесины τ_f , мин.
Без огнезащиты и при пропитке антипиренами	4
Штукатурка гипсовая, $\delta=(10-12)$ мм	30
Штукатурка цементная по металлической сетке, $\delta=(10-15)$ мм	30
Полужесткая минераловатная плита, $\delta=70$ мм	35
Асбестоцементноперлитовый плоский лист, $\delta=(10-12)$ мм	20
Асбестоцементный прессованный плоский лист, $\delta=(10-12)$ мм	15
Вспучивающиеся покрытия:	8
а) ВПД (4 слоя)	
б) ОФП-9 (2 слоя)	8

Изменение рабочего сечения деревянных конструкций за счет обугливания древесины, после ее воспламенения при пожаре, определяется в зависимости от скорости обугливания древесины при воздействии стандартного пожара. Значения скорости обугливания древесины V , в зависимости от размеров сечения конструкции, клееной или цельной древесины, следует принимать по таблице 2.2.

При расчете изменения рабочего сечения деревянных конструкций при пожаре следует учитывать схему воздействия пожара на рассматриваемую конструкцию:

- одностороннее воздействие пожара (междуэтажные деревянные перекрытия);
- трехстороннее воздействие пожара (деревянные балки, деревянные стойки, примыкающие к стенам);
- четырехстороннее воздействие пожара (деревянные колонки, стойки и т.п.)

Пример решения задачи

Рассчитать фактический предел огнестойкости сжатого деревянного элемента из условия прочности.

Дано: Деревянная стойка из цельной древесины. Материал стойки – сосна второго сорта. Сечение $b \times l = (0,18 \times 0,2)$ м. Влажность древесины $> 9\%$. Нагрузка на стойку $N_n = 500$ кН.

Варианты огнезащиты:

- а) без огнезащиты
- б) огнезащита слоем штукатурки ($\delta = 15$ мм)
- в) огнезащита вспучивающимся покрытием ВПД (2 слоя)

Решение:

Определяем время t_f от начала теплового воздействия пожара на стойку до воспламенения древесины (таблица 2.3)

с огнезащитой слоем штукатурки ($\delta = 15$ мм) - $t_f = 30$ мин.

2. Определяем скорость обугливания древесины стойки при горении

Согласно табл. 2.2 для стойки с наименьшей стороной сечения > 120 мм, из цельной древесины:

$$V = 0,8 \text{ мм/мин.} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/мин.}$$

3. Определяем расчетное сопротивление древесины стойки сжатию. Согласно табл. 2.1 имеем для древесины второго сорта $R_{fc}=23$ МПа.

4. Определяем напряжение сжатия $\sigma_{fc}(\tau)$ в стойке от заданной нормативной сжимающей нагрузки N_p в различные моменты времени воздействия пожара τ , после воспламенения древесины ($\tau > \tau_f$).

4.1. Задаемся несколькими последовательными моментами времени горения древесины стойки при пожаре: τ до момента когда напряжение сжатой стойки превысит расчетное сопротивление сжатия.

4.2. Определяем для выбранных моментов времени изменения размеров сечения стойки $b(\tau)$, $h(\tau)$ в результате обугливания и, соответственно, $A_n(\tau)$ и напряжения сжатия в стойке, по формуле (3)

$$\sigma_{fc}(\tau) = \frac{N_n}{A_n(\tau)}$$

Представим результаты расчетов в таблице и графике:

Таблица 2.4 - Результаты расчетов

Время горения балки при пожаре - τ , мин.	$l(\tau)$, м	$b(\tau)$, м	$A_n(\tau)$, м ²	$\sigma_{fc}(\tau)$, МПа
0	0,2	0,18	0,036	13,9
10	0,184	0,164	0,03	16,6
20	0,168	0,148	0,0249	20,1
30	0,152	0,132	0,0201	24,9

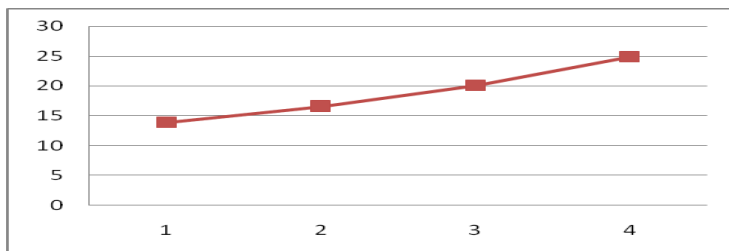


Рисунок 1 - График нормативного сопротивления сжатию

Как видно из графика нормативное сопротивление сжатию для заданного деревянного элемента с заданной нагрузкой $R_{fc}=23$ МПа достигается в диапазоне времени пожара $20<\tau<30$ мин.

Используя линейную интерполяцию определим τ_r .

$$\tau_r = 30 - (30 - 20) \cdot \frac{24,9 - 23}{24,9 - 20,1} = 26 \text{ мин.}$$

Определяем искомое значение фактического предела огнестойкости τ_{fr} рассматриваемой стойки по признаку утраты прочности, с учетом заданных вариантов огнезащиты стойки.

с огнезащитой слоем штукатурки ($\delta=15$ мм):

$$\tau_{f.r}(R) = \tau_f + \tau_r = 30 + 26 = R56$$

Ответ: фактический предел огнестойкости R56.

Варианты заданий для самостоятельной работы

Рассчитать фактический предел огнестойкости по несущей способности.

В случае трехстороннего обогрева считать наибольшую из не обогреваемых поверхностей. При 2 стороннем обогреве считать, что стойка расположена в углу конструкции.

Таблица 2.5 - Варианты заданий для самостоятельной работы

№ варианта	Сечение bхl см	Нагрузка на стойку N_n кН	Количество обогреваемых сторон	Материал стойки
1	15х20	450	2	Ель 1 сорта
2	20х20	350	3	Ель 3 сорта
3	20х20	500	2	Ель 2 сорта
4	18х20	400	2	Сосна 2 сорта
5	18х20	350	3	Сосна 1 сорта
6	10х15	300	3	Ель 1 сорт

Продолжение Таблица 2.5 - Варианты заданий для самостоятельной работы

№ варианта	Сечение bхl см	Нагрузка на стойку N _n кН	Количество обогреваемых сторон	Материал стойки
7	10х20	400	2	Ель 2 сорт
8	28х30	550	3	Ель 1 сорт
9	25х30	450	2	Ель 3 сорт
10	30х30	600	4	Сосна 1 сорт

1-10 вариант. Асбестоцементноперлитовый плоский лист, $\delta=(10-12)$ мм

11-20 вариант. Штукатурка гипсовая, $\delta=(10-12)$ мм

21-30 вариант. Вспучивающиеся покрытия ВПД (4 слоя)

2.2 Предел огнестойкости металлических конструкций

Фактические пределы огнестойкости по потере прочности (R) (см. таб.2.4) различных несущих металлических конструкций оцениваются в справочной литературе в зависимости от приведенной толщины металла поперечного сечения конструкции (t_{red}), которая определяется по формуле:

$$t_{red} = \frac{A}{U}, \quad (11)$$

где A – площадь поперечного сечения металлической конструкции, см²;

U – обогреваемая часть периметра сечения конструкции, см.

Поверхности металлических конструкций, примыкающие к плитам, настилам перекрытий и стенам, допускается не учитывать при определении обогреваемой части периметра сечения металлической конструкции при условии, что предел огнестойкости этих конструкций не ниже предела огнестойкости самой металлической конструкции:

$$t_{red} = \frac{A}{U - a}, \quad (12)$$

где a – часть периметра металлической конструкции, примыкающей к плитам, настилам перекрытий и стенам.

Пример 1

Определить приведенную толщину металла t_{red} , для сечения вида (см. рис 2.1)

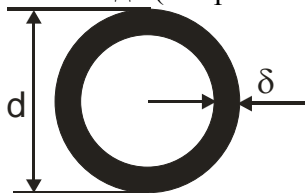


Рис. 2.1 Поперечное сечение трубы

при условии, что обогрев конструкции идет с внешней стороны.

Решение:

1) Площадь поперечного сечения кольца (A) с внешним диаметром d и толщиной δ определяется по формуле:

$$A = S_{\text{кр.б.}} - S_{\text{кр.в.}} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} - \pi \cdot \frac{(d - 2\delta)^2}{4} = \pi\delta(d - \delta)$$

2) Периметр обогрева (U) равен длине окружности диаметром d :

$$U = \pi \cdot d$$

3) Приведенная толщина поперечного сечения конструкции (t_{red}) равна:

$$t_{red} = \frac{A}{U} = \frac{\pi\delta(d - \delta)}{\pi d} = \frac{\delta(d - \delta)}{d}$$

Пример 2

Определить предел огнестойкости металлической колонны

Дано:

Колонна стальная, в виде составного двутавра, незащищенная. Поперечное сечение металлической колонны

и схема воздействия на нее температурного режима пожара представлены на рис.2.4

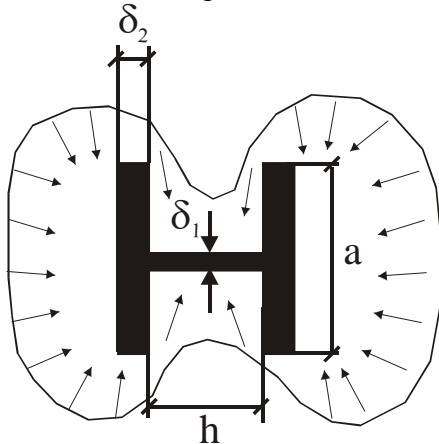


Рис. 2.2 Поперечное сечение двутавра

Геометрические размеры колонны:

$a=360$ мм, $h=360$ мм, $\delta_1=16$ мм, $\delta_2=16$ мм.

Решение:

1. Выбираем схему воздействия пожара на заданную конструкцию.

Принимаем, что весь периметр поперечного сечения рассматриваемой колонны в условиях пожара будет подвергаться высокотемпературному воздействию (см. рис. 2.2)

2. Определяем площадь поперечного сечения нижнего пояса фермы:

$$A = 2(36 \cdot 1,6) + (36 \cdot 1,6) = 172,8 \text{ см}^2$$

3. Определяем значение обогреваемой части периметра поперечного сечения нижнего пояса фермы:

$$U = 2[36 + (2 \cdot 1,6) + (36 - 1,6)] + (2 \cdot 36) = 219,2 \text{ см}$$

4. Определяем значение приведенной толщины металла t_{red} рассматриваемой конструкции по формуле (1):

$$t_{red} = \frac{A}{U},$$

5. Тогда значение приведенной толщины металла колонны t_{red} будет равно:

$$t_{red} = \frac{A}{U} = \frac{172,8}{219,2} = 0,79 \text{ см}$$

6. Определяем искомый предел огнестойкости заданной колонны

Согласно п. 1, табл. 9.2.9, раздела 9.2.3 имеем:

При $t_{red}=0,79 \text{ см}$, $\tau_{f.r.}^{\phi} = R12$.

Таблица 2.6 Пределы огнестойкости несущих металлических конструкций

№ п/п	Краткая характеристика конструкции	Размеры, см	Предел огнестойкости, мин.
1	Стальные балки, прогоны, ригели и статически определимые фермы, при опирании плит и настилов по верхнему поясу, а также колонны и стойки без огнезащиты с приведенной толщиной металла t_{red} указанной в столбце 3	$t_{red}=0,3$ 0,5 1,0 1,5 2,0 3,0	R 7,2 R 9 R 15 R 18 R 21 R 27
2	Стальные балки, прогоны, ригели и статически определимые фермы при опирании плит и настилов на нижние пояса и полки конструкции с толщиной металла t нижнего пояса, указанной в столбце 3	$t=0,5$ 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 4,0	R 18 R 21 R 27 R 30 R 33 R 36 R 42

Продолжение Таблица 2.6 Пределы огнестойкости несущих металлических конструкций

№ п/п	Краткая характеристика конструкции	Размеры, см	Предел огнестойкости, мин.
3	Стальные балки перекрытий и конструкций лестниц при огнезащите по сетке слоем бетона или штукатурки, толщиной а	а=1 2 3	R 45 R 90 R 150

2.3 Предел огнестойкости железобетонных конструкций

Расчет температур прогрева сечений бетонных и железобетонных конструкций при воздействии стандартного пожара.

Основные положения.

При проведении расчетов следует принимать:

- начальную температуру бетонных и железобетонных конструкций $T_0=20^{\circ}\text{C}$;
- температурный режим пожара соответствующим температурному режиму стандартных огневых испытаний на огнестойкость, который описывается выражением:

$$T_f^{st}(\tau) = 345 \cdot \lg(480\tau + 1) + T_0 \quad (13)$$

где τ - время воздействия пожара, ч;

$T_f^{st}(\tau)$ - температура пожара, воздействующая на конструкцию в момент времени τ , $^{\circ}\text{C}$.

При расчете температур прогрева сечений рассматриваемых конструкций следует учитывать изменение характеристик теплопереноса материалов конструкций в зависимости от температуры:

- коэффициента теплопроводности - $\lambda(T)$;
- коэффициента удельной теплоемкости - $c(T)$.

Коэффициент теплопроводности $\lambda(T)$ бетона и арматуры [Вт/(м⁰С)] допускается определять по формуле:

$$\lambda(T) = A + B \cdot T, \quad (14)$$

Удельную теплоемкость бетона и арматуры [кДж/(кг⁰С)] допускается определять по формуле:

$$c(T) = C + D \cdot T, \quad (15)$$

где A, B, C, D – постоянные значения, принимающиеся по таблице 2.7.

Таблица 2.7 Свойства железобетонных конструкций

Материалы	Средняя плотность бетона ρ , кг/м ³	Значения параметров A, B, C, D для определения коэффициента теплопроводности, Вт/(м ⁰ С) и удельной теплоемкости, кДж/(кг ⁰ С)				Эксплуатационная массовая влажность w , %
		A	B	C	D	
Тяжелый бетон с крупным заполнителем из силикатных пород	2350	1,20	-0,00035	0,71	0,00083	2,5
Тяжелый бетон с заполнителем из карбонатных пород	2350	1,14	-0,00055	0,71	0,00083	3,0
Легкий бетон с крупным заполнителем из керамзита	1600	0,36	0,00012	0,83	0,00042	5,0
Керамзито-перлитобетон	1200	0,18	0,00008	0,92	0,00048	6,0
Легкий бетон с крупным и мелким заполнителем из керамзита	750					
Арматурная сталь	-	65	-0,048	0,44	0,00063	-

При расчете допускается использовать также приведенные (осредненные) значения коэффициента

температуропроводности α_{red} (м²/ч), которые определяются по формуле:

$$\alpha_{red} = \frac{3,6\lambda(T = 450^{\circ}C)}{[c(T = 450^{\circ}C) + 0,05w] \cdot \rho}, \quad (16)$$

где $\lambda(T = 450^{\circ}C)$, $c(T = 450^{\circ}C)$ - характеристики теплопереноса материалов конструкций, определяемые по формулам (2) и (3) при $T=450^{\circ}C$; w - эксплуатационная влажность бетона, %.

Расчет температуры в определенной точке прогреваемого сечения бетонной или железобетонной конструкции через заданное время огневого воздействия.

Температуру бетона (T_b) и арматуры (T_s) конструкции через время $\tau = \tau_0$ после начала огневого воздействия по режиму стандартного пожара (1), в любой точке сечения конструкции расположенной, соответственно, на расстояниях x_i (для бетона) и Y_i (для арматуры) от каждой i -ой обогреваемой поверхности (см. рис. 2.3 и рис. 2.4), в зависимости от количества обогреваемых поверхностей и их взаимного расположения, определяют по формулам:

$$\tau = \tau_0$$

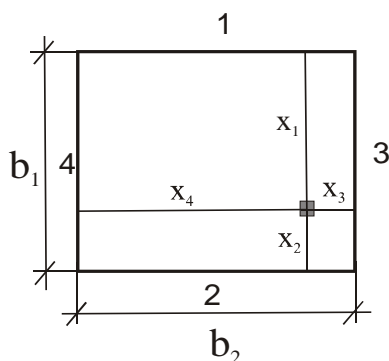


Рисунок 2.3 - Расчетная схема прогрева для бетона при четырехстороннем огневом воздействии.

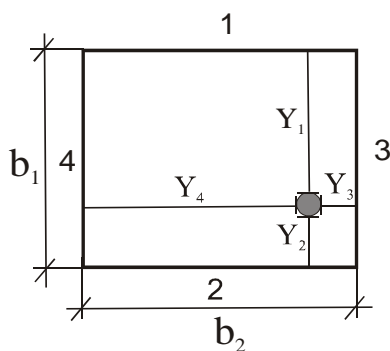


Рисунок 2.4 - Расчетная схема прогрева для арматуры при четырехстороннем огневом воздействии.

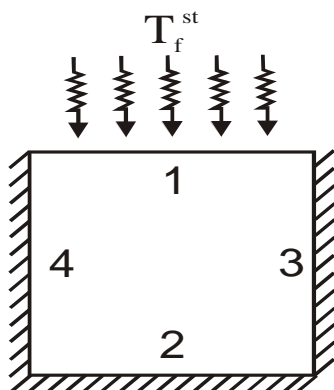


Рисунок 2.5 - Односторонний обогрев железобетонной конструкции

- при двух параллельных обогреваемых поверхностях (см. рис.2.6):

$$T = 20 + 1200 \cdot [(1 - r_1)^2 + (1 - r_2)^2] \quad (18)$$

Примечание: Данная формула применима при $x_i \leq 0,7h$, где h – расстояние от обогреваемой поверхности конструкции до противоположной.

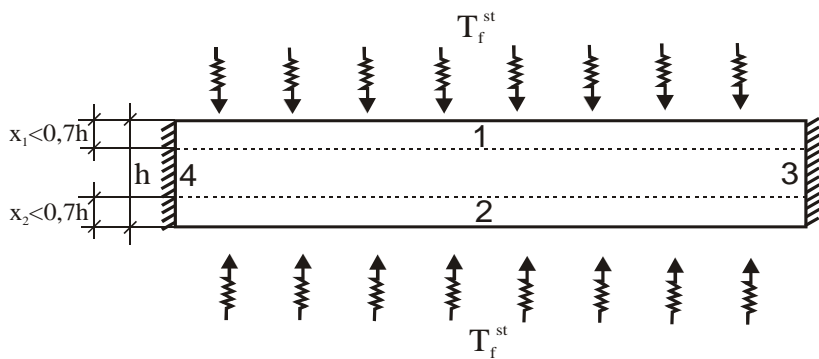


Рисунок 2.6 - Двухсторонний обогрев железобетонной конструкции

- при трехстороннем воздействии пожара, когда первая и вторая поверхности конструкций параллельны, а третья им перпендикулярна

(см. рис.2.7):

$$T = 1220 - 1200 \cdot [1 - (1 - r_1)^2 + (1 - r_2)^2] \cdot [1 - (1 - r_3)^2] \quad (19)$$

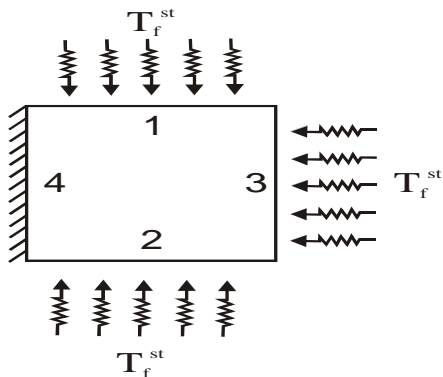


Рисунок 2.7 - Трехсторонний обогрев железобетонной конструкции

- при четырехстороннем огневом воздействии на конструкцию:

$$T = 1220 - 1200 \cdot [1 - (1 - r_1)^2 - (1 - r_2)^2] \cdot [1 - (1 - r_3)^2 - (1 - r_4)^2] \quad (20)$$

$$\text{где } r_i = \frac{x_i^*}{l} \quad (21)$$

x_i^* - параметр, который определяется из следующих выражений:

- при определении температуры прогрева бетона:

$$x_i^* = x_i + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} \quad (22)$$

- при определении температуры прогрева арматуры:

$$x_i^* = Y_i + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s \quad (23)$$

где: x_i - расстояние от рассматриваемой точки сечения бетона до i -ой обогреваемой поверхности, м;

Y_i - расстояние от i -ой обогреваемой поверхности до ближайшего к ней края арматуры, м;

Примечание: Если $r_i > 1$, то $r_i = 1$.

l - толщина начавшего прогреться слоя бетона, м:

$$l = \sqrt{12 \cdot \alpha_{red} \cdot \tau_0} \quad (24)$$

где α_{red} - приведенный (осредненный) коэффициент температуропроводности, м²/ч;

τ_0 - время огневого воздействия, ч;

φ_1 и φ_2 - коэффициенты, зависящие от плотности бетона, см. табл. 2,6

Таблица 2.8 - Коэффициенты, зависящие от плотности бетона

Плотность бетона ρ , кг/м ³	500	1000	1500	2000	2350	2450
φ_1	0,46	0,55	0,58	0,60	0,62	0,65
φ_2	1,0	0,85	0,65	0,5	0,5	0,5

d_s - диаметр арматуры, м.

Расчет глубины прогрева обогреваемого сечения бетонной или железобетонной конструкции до критической температуры через заданное время огневого воздействия $\delta=f(\tau)$

Расчет толщин слоев бетона, прогретых до критической температуры T_{cr} и выше за время воздействия «стандартного» пожара $\tau = \tau_0$ производится:

- при одной обогреваемой поверхности конструкции (рис. 2.8) по формулам:

$$\delta_1 = r_1 \cdot l - \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}, \quad (25)$$

$$r_1 = 1 - \sqrt{\frac{T^{cr} - 20}{1200}}, \quad (26)$$

где: l – определяют по формуле: $l = \sqrt{12 \cdot \alpha_{red} \cdot \tau_0}$

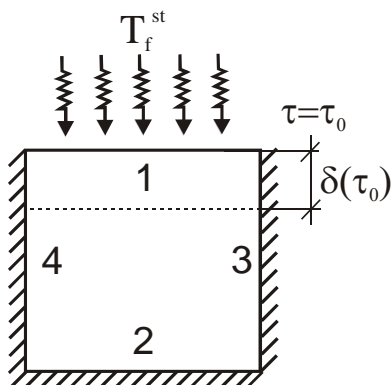
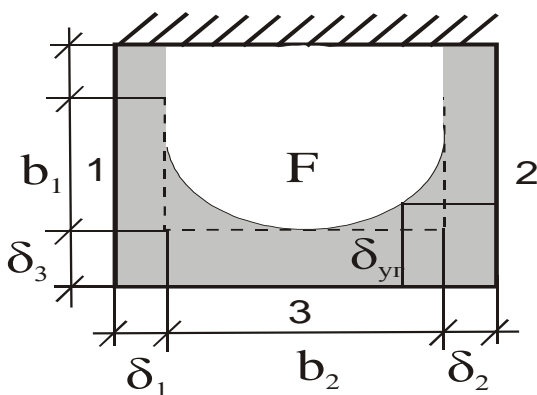


Рисунок 2.8 - Глубина прогрева железобетонной конструкции при одностороннем обогреве

- при трехстороннем обогреве конструкции прямоугольного сечения (первая и вторая обогреваемые поверхности параллельны, расстояние между ними равно “ b_2 ” и перпендикулярны третьей), толщина прогретого до T_{cr} слоя δ_3 у третьей обогреваемой поверхности определяется (см. рис.2.9) по формулам:

$$\tau = \tau_0$$



$$T = T_{st}(\tau_0)$$

Рисунок 2.9 - Глубина прогрева железобетонной конструкции при трехстороннем обогреве

$$r = (b_2/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l \quad (r \leq 1) \quad (27)$$

$$w = 1 - 2 \cdot (1 - r)^2 \quad (28)$$

$$r_3 = 1 - \sqrt{\frac{1200w - 1220 + T_{cr}}{1220w}} \quad (29)$$

$$\delta_3 = r_3 \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} \quad (30)$$

$\delta_{1,2}$ - определяются по формулам, как для односторонне прогреваемой поверхности.

$$\delta_{1,2} = r_1 \cdot l - \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} \quad (31)$$

$$r_1 = 1 - \sqrt{\frac{T_{cr} - 20}{1200}} \quad (32)$$

Глубина прогрева внутри угла определяется по формуле:

$$\delta_{yz} = r_{yz} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} \quad (33)$$

$$\text{где } r_{yz} = 1 - \sqrt{1 - \sqrt{\frac{1220 - T_{cr}}{1220}}} \quad (34)$$

- при четырехстороннем воздействии пожара толщины слоев, прогретых до критической температуры: $\delta_{1,2}$; $\delta_{3,4}$; $\delta_{уг}$ (см. рис. 2.10), определяются по формулам:

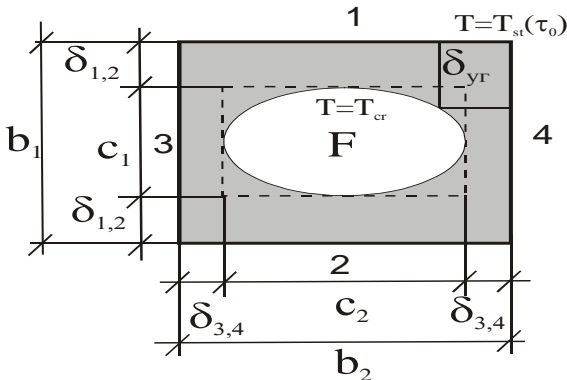


Рисунок 2.10 - Глубина прогрева железобетонной конструкции при круговом обогреве

$$r_{1,2} = (b_2/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l \quad (r_{1,2} \leq 1)$$

$$w_{1,2} = 1 - 2 \cdot (1 - r_{1,2})^2,$$

$$r'_{1,2} = 1 - \sqrt{\frac{1200w_{1,2} - 1120 + T_{cr}}{1220w_{1,2}}},$$

$$\delta_{1,2} = r'_{1,2} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}}$$

$$r_{3,4} = (b_1/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l \quad (r_{3,4} \leq 1),$$

$$w_{3,4} = 1 - 2(1 - r_{3,4})^2,$$

$$r'_{3,4} = 1 - \sqrt{\frac{1200w_{3,4} - 1220 + T_{cr}}{1220w_{3,4}}},$$

$$\delta_{3,4} = r'_{3,4} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}}$$

Глубина прогрева внутри угла определяется по формуле:

$$\delta_{yz} = r_{yz} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}}, \text{ где}$$

$$r_{yz} = 1 - \sqrt{1 - \sqrt{\frac{1220 - T_{cr}}{1220}}}$$

Площадь сечения F , ограниченную на момент времени $\tau = \tau_0$ изотермой $T = T^{cr}$ при четырехстороннем тепловом воздействии на конструкцию квадратного сечения ($b_1 = b_2 = b$) по режиму стандартного пожара, можно определить по формуле:

$$F = \psi \cdot (2 \cdot c)^2 \quad (35)$$

$$c = \frac{b}{2} - \delta_c^{cr} \quad (36)$$

$$\delta_c^{cr} = r' \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} \quad (37)$$

$$r' = 1 - \sqrt{\frac{1200w - 1220 + T_{cr}}{1220w}} \quad (38)$$

$$w = 1 - 2(1 - r)^2 \quad (39)$$

$$r = (b/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l \quad (r \leq 1) \quad (40)$$

$$\psi = \frac{b_0}{c} - 0,2, \text{ но более } 1.$$

$$b_0 = \frac{b}{2} - \delta_{yz} \quad (41)$$

Плоские конструкции (плиты). Расчет времени достижения критической температуры в растянутой арматуре плоских сплошных односторонне прогреваемых железобетонных конструкций.

Расчет времени достижения критической температуры (T_s^{cr}) в растянутой арматуре плоских сплошных односторонне прогреваемых конструкций $\tau_{f.r}$ (ч) производится по формуле:

$$\tau_{f.r} = \frac{1}{12 \cdot \alpha_{red}} \left(\frac{\delta_s + \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s}{1 - \sqrt{\frac{T_s^{cr} - 20}{1200}}} \right)^2 \quad (42)$$

где α_{red} - осредненное значение коэффициента температуропроводности бетона ($\text{м}^2/\text{ч}$), которое определяется по формуле:

$$\alpha_{red} = \frac{3,6\lambda(T = 450^\circ\text{C})}{[c(T = 450^\circ\text{C}) + 0,05w] \cdot \rho} \quad (43)$$

φ_1 и φ_2 - коэффициенты, зависящие от плотности бетона, (см. табл. 2.7)

δ_s - толщина защитного слоя бетона от обогреваемой поверхности до ближайшего к ней края арматуры, м;

d_s - средний диаметр растянутой арматуры плиты (м), определяемый по формуле:

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^N d_{s,i} \cdot A_{s,i}}{\sum_{i=1}^N A_{s,i}} \quad (44)$$

где $A_{s,j}$ - площадь поперечного сечения j-ой арматуры, м²;

$d_{s,j}$ - диаметр j-ой арматуры, м.

Для того, чтобы определить значение критической температуры арматуры в плите T_s^{cr} необходимо определить $\gamma_{s,T}$.

Если в плите имеется только растянутая арматура и отсутствует сжатая, то $\gamma_{s,T}$ определяется по формуле:

$$\gamma_{sT} = \frac{M}{h_0 \cdot A_s \cdot R_{su}} / \left(1 - \frac{M}{2bh_0^2 R_{bu}} \right) \quad (45)$$

где M - максимальный изгибающий момент в плите, Н·м;

h_0 - рабочая высота сечения плиты ($h_0 = h - \delta_s - \frac{d_s}{2}$), м;

A_s - суммарная площадь поперечных сечений всех арматурных стержней, м²; $A_s = \sum_{i=1}^N A_{s,i}$

R_{su} - расчетное сопротивление растяжению арматуры, Па;

$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{R_{sn}}{0,9}$, R_{sn} - нормативное сопротивление

растяжению арматуры, Па.

R_{bu} - расчетное сопротивление сжатию бетона, Па;

$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_s} = \frac{R_{bn}}{0,83}$, R_{bn} - нормативное сопротивление

сжатию бетона, Па.

b - ширина плиты, м;

T_s^{cr} - критическая температура прогрева арматуры (°C) определяется в зависимости от класса стали и величины $\gamma_{s,T}$ по таблице 2.9 [1]).

Таблица 2.9 [1] - Зависимость критического прогрева арматуры в зависимости от класса стали и величины $\gamma_{s,T}$.

Класс стержневой арматуры	Коэффициент условий работы стержневой арматуры $\gamma_{s,T}$ при температуре арматуры, °C									
	≤350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
A-I (A240)	1,0	1,0	0,8	0,65	0,50	0,35	0,23	0,15	0,05	0
A-II (A300)	1,0	1,0	0,90	0,70	0,50	0,35	0,23	0,15	0,05	0
A-IIв (A300-в)	1,0	1,0	0,80	0,60	0,40	0,25	0,10	0,05	0,03	0
A-III (A400)	1,0	1,0	0,95	0,75	0,60	0,45	0,30	0,15	0,10	0,05
A-IIIв (A400в)	1,0	1,0	0,90	0,65	0,45	0,35	0,20	0,10	0,05	0
A-IV (A600)	1,0	0,95	0,80	0,65	0,45	0,35	0,20	0,10	0,05	0
A-V (A800)	1,0	0,95	0,80	0,60	0,40	0,25	0,10	0,05	0,03	0
AT-IV (AT600)	1,0	0,9	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,03	0
AT-V (AT800)										
AT-VI (AT1000)	1,0	0,8	0,55	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,03	0
AT-VII (AT1200)										

Колонны. Расчет несущей способности железобетонных конструкций, подвергаемых воздействию пожара.

Несущая способность $P(\tau)$ центрально сжатых железобетонных колонн, подвергаемых воздействию пожара с четырех сторон, вычисляется по формулам:

$$P(\tau_0) = \varphi \cdot [R_{su} \cdot \gamma_{sT} \cdot A_{s,tot} + R_{bu} \cdot A(\tau_0)],$$

где R_{su} - расчетное сопротивление сжатию арматуры, МПа;

R_{bu} - расчетное сопротивление сжатию бетона, МПа;

Расчетные сопротивления определяются делением нормативных сопротивлений R_{sn} и R_{bn} , соответственно, на соответствующие коэффициенты надежности – по бетону $\gamma_b=0,83$, по арматуре $\gamma_s=0,9$;

γ_{sT} - коэффициент условий работы при пожаре арматуры (его значение зависит от температуры нагрева и типа арматуры, что, в свою очередь, зависит от толщины защитного слоя, марки бетона и времени нагрева железобетонной конструкции);

$A_{s,tot}$ - суммарная площадь сечения всех арматурных стержней, м²;

$A(\tau_0)$ - рабочая (неповрежденная пожаром) площадь сечения бетонной колонны на момент времени $\tau = \tau_0$, м² (площадь сечения ограниченная изотермой $T < T_b^{cr}$), где T_b^{cr} – критическая температура нагрева бетона, т.е. температура при которой мгновенно утрачиваются прочностные свойства бетона.

ϕ - коэффициент продольного изгиба центрально-сжатых колонн прямоугольного сечения находится по таблице в зависимости от вида бетона, расчетной длины колонны l и от размера стороны рабочего (неповрежденного пожаром сечения) $h_b(\tau)$ (см. следующую табл.).

Таблица 2.10 - Соотношение длины и ширины ж/б конструкции на момент времени (τ)

Вид бетона	Коэффициент продольного изгиба ϕ при $l/h_b(\tau)$									
	≤ 8	10	12	14	16	18	20	22	26	30
Тяжёлый	1,0	0,98	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,77	0,68	0,59
Лёгкий	1,0	0,98	0,90	0,84	0,78	0,73	0,67	0,61	0,51	0,41

В свою очередь, l зависит от схемы опирания колонны:

- при шарнирном закреплении обоих концов $l=l_0$;

- при полном защеплении обоих концов $l=0,5l_0$;
- при полном защемлении одного конца (нижнего) и шарнирно подвижном закреплении другого (верхнего) $l=0,7l_0$.

Если в конкретный момент времени $\tau = \tau_0$ $P(\tau) \leq N_n$, где N_n - нормативная нагрузка на колонну, то считается, что на этот момент времени колонна утратила свою несущую способность.

2.4 Расчет огнестойкости железобетонных конструкций

Пример 1 Расчет предела огнестойкости железобетонной плиты перекрытий по признаку потери несущей способности «R»

Дано:

Железобетонная плита перекрытия, многопустотная свободно опирающаяся по двум сторонам. Размеры плиты: ширина $b=1,2$ м; длина рабочего пролета $l=5,9$ м; высота сечения $h=0,24$ м. Толщина защитного слоя бетона до низа растянутой арматуры $\delta_s=0,02$ м, диаметр пустот $d_{\text{п}}=0,16$ м.

Бетон: тяжелый, класса В15 на гранитном заполнителе, $R_{\text{бу}}$ (расчетное сопротивление сжатию бетона) = 13,5 МПа.

Арматура: растянутая класса Ат-V ($R_{\text{ст}}$ (расчетное сопротивление растяжению арматуры) = 872 МПа; 2 стержня диаметром 12 мм ($A_{s,1}=1,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$), два стержня диаметром 14 мм ($A_{s,2}=1,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

Нагрузка: нормативная $q=6700$ Па, от собственного веса $p=3000$ Па.

Решение:

1) Определяем значения максимального изгибающего момента в плите:

$$M = \frac{(p+q)b \cdot l^2}{8} = \frac{(3000 + 6700) \cdot 1,2 \cdot 5,9^2}{8} = 5,07 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2) Определяем рабочую высоту сечения плиты:

$$h_0 = h - \delta_s - \frac{d_s}{2},$$

где

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^N d_{s,i} \cdot A_{s,i}}{\sum_{i=1}^N A_{s,i}} = \frac{2 \cdot (0,012 \cdot 1,13 \cdot 10^{-4} + 0,014 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4})}{2(1,13 \cdot 10^{-4} + 1,54 \cdot 10^{-4})} = 0,0132 \text{ м},$$

$$h_0 = 0,24 - 0,02 - \frac{0,0132}{2} = 0,0213 \text{ м}$$

3) Определяем коэффициент условий работы при пожаре $\gamma_{s,T}$ растянутой арматуры.

$$\gamma_{sT} = \frac{M}{h_0 \cdot A_s \cdot R_{su}} \left(1 - \frac{M}{2bh_0^2 R_{bu}} \right) = \frac{5,07 \cdot 10^4}{0,213 \cdot 5,34 \cdot 10^{-4} \cdot 872 \cdot 10^6} \left(1 - \frac{5,07 \cdot 10^4}{2 \cdot 1,2 \cdot (0,213)^2 \cdot 13,25 \cdot 10^6} \right) = 0,53$$

4) Определяем значение критической температуры растянутой арматуры плиты (таблица 2.8 [1]):

Согласно таблице для стали класса Ат-V при $\gamma_{s,T}=0,53$ по интерполяции получаем:

$$T_s^{cr} = 450 + \frac{0,7 - 0,53}{0,7 - 0,5} \cdot 50 = 492 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5) Значение предела огнестойкости сплошной железобетонной плиты по признаку потери несущей способности «R» (ч) определяют по формуле:

$$\tau_{f.r} = \frac{1}{12 \cdot \alpha_{red}} \left(\frac{\delta_s + \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s}{1 - \sqrt{\frac{T_s^{cr} - 20}{1200}}} \right)^2$$

Вычислим значение α_{red} :

$$\alpha_{red} = \frac{3,6\lambda(T = 450^\circ \text{C})}{[c(T = 450^\circ \text{C}) + 0,05w] \cdot \rho}$$

Для тяжелого бетона с заполнителем из силикатных пород (см. табл. 2.8 [1]):

A=1,20; B=-0,00035; C=0,71; D=0,00083; W=2,5%; $\rho=2350 \text{ кг/м}^3$.

$$\lambda(T = 450^{\circ}C) = A + B \cdot T = 1,20 - 0,00035 \cdot 450 = 1,04 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$$

$$c(T = 450^{\circ}C) = C + D \cdot T = 0,71 + 0,00083 \cdot 450 = 1,08 \text{ кДж/(кг}^{\circ}\text{C)}$$

$$\alpha_{red} = \frac{3,6 \cdot 1,04}{[1,08 + 0,05 \cdot 2,5] \cdot 2350} = 0,00132 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Определяем значения коэффициентов φ_1 и φ_2 (см. табл 2.9 [1]):

При $\rho = 2350 \text{ кг/м}^3$ $\varphi_1 = 0,62$ и $\varphi_2 = 0,5$

Таким образом, мы можем определить $\tau_{f,r}$:

$$\tau_{f,r} = \frac{1}{12 \cdot \alpha_{red}} \left(\frac{\delta_s + \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s}{1 - \sqrt{\frac{T_s^{cr} - 20}{1200}}} \right)^2 =$$

$$\frac{1}{12 \cdot 0,00132} \cdot \left(\frac{0,02 + 0,62 \cdot \sqrt{0,00132} + 0,5 \cdot 0,0133}{1 - \sqrt{\frac{492 - 20}{1200}}} \right)^2 = 1,08$$

ч. или R65

б) Предел огнестойкости многопустотных свободноопирающихся плит по признаку потери несущей способности «R» можно принимать как для аналогичных сплошных плит с коэффициентом 0,9. Тогда для рассматриваемого случая:

$$\tau_{f,r}^{норм} = \tau_{f,r} \cdot 0,9 = R65 \cdot 0,9 = R58$$

Пример 2. Расчет предела огнестойкости ж/б колонны по признаку «R» - потере несущей способности.

Дано: Железобетонная колонна сечением (0,3х0,3) м, длина колонны $l_o = 3,6$ м. Шарнирное закрепление сверху и внизу. Нормативная нагрузка на колонну $N_n = 1390 \text{ кН}$.

Бетон: класса В40 ($R_{bu} = 34,9$ МПа) – тяжелый с заполнителем из силикатных пород ($\rho = 2350$ кг/м³).

Арматура: класса А-III ($R_{su} = 433$ МПа), 4 стержня диаметром $d_s = 12$ мм и площадью сечения $A_s = 1,14 \cdot 10^{-4}$ м².

Расстояние от края арматуры до обогреваемой поверхности колонны $\delta_s = 0,032$ м.

Решение:

1. Решаем теплотехническую задачу огнестойкости, применительно к рассматриваемой конструкции – проводим расчет температур прогрева арматуры и бетона колонны в заданный момент времени воздействия стандартного пожара.

1.1. Выбираем схему четырехстороннего воздействия пожара на колонну и рассмотрим результат его воздействия на колонну в момент времени $\tau_1 = 1,5$ ч.

1.2. Определяем значение приведенного коэффициента температуропроводности прогреваемого слоя бетона колонны.

Согласно результатам предыдущей задачи $\alpha_{red} = 0,00132$ м²/ч

1.3. Определяем значения коэффициентов φ_1 и φ_2 .

При $\rho = 2350$ кг/м³ $\varphi_1 = 0,62$ и $\varphi_2 = 0,5$.

Определяем температуру прогрева арматуры T_s колонны в первый расчетный момент времени воздействия пожара $\tau_1 = 1,5$ ч.

В силу симметричности сечения колонны и воздействия пожара на нее, рассмотрим только один из четырех арматурных стержней, расположенный между обогреваемыми поверхностями «1» и «3» (см. рис. 1).

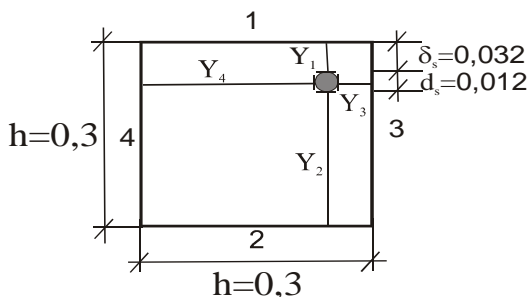


Рисунок 2.11 - Расчет прогрева арматурных стержней

Определим параметры x_i^* для заданного арматурного стержня, для чего воспользуемся формулой:

$$x_i^* = Y_i + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s$$

здесь Y_i - расстояние от i -ой обогреваемой поверхности до ближайшего к ней края арматуры, м;

Как видно из рис., в силу симметрии $x_1^* = x_3^*$ и $x_2^* = x_4^*$.

$$x_1^* = Y_1 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s = 0,032 + 0,62 \cdot \sqrt{0,00132} + 0,5 \cdot 0,012 = 0,0605 \text{ м}$$

$$\begin{aligned} x_2^* &= Y_2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s = (h - \delta_s - d_s) + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}} + \varphi_2 \cdot d_s = \\ &= (0,300 - 0,032 - 0,012) + 0,62 \cdot \sqrt{0,00132} + 0,5 \cdot 0,012 = 0,285 \text{ м} \end{aligned}$$

Определим значения параметра $r_i = \frac{x_i^*}{l}$, где

$$l = \sqrt{12 \cdot \alpha_{red} \cdot \tau_1} = \sqrt{12 \cdot 0,00132 \cdot 1,5} = 0,154 \text{ м}$$

$$r_1 = r_3 = \frac{x_1^*}{l} = \frac{0,0605}{0,154} = 0,393$$

$$r_2 = r_4 = \frac{x_2^*}{l} = \frac{0,285}{0,154} = 1,85$$

Т.к. $r_2 > 1$ и $r_4 > 1$, то $r_2 = r_4 = 1$ (обогрев колонны со сторон 2 и 4 не оказывает влияния на прогрев заданного арматурного стержня)

Определяем значение температуры прогрева арматуры T_s при $\tau_1 = 1,5$ ч по формуле:

$$\begin{aligned}
T_s(\tau = 1,5\text{ч}) &= 1220 - 1200 \cdot [1 - (1 - r_1)^2 - (1 - r_2)^2] \cdot [1 - (1 - r_3)^2 - (1 - r_4)^2] = \\
&= 1220 - 1200 \cdot [1 - (1 - 0,393)^2 - (1 - 1)^2] \cdot [1 - (1 - 0,393)^2 - (1 - 1)^2] = \\
&= 1220 - 1200 \cdot [1 - (1 - 0,393)^2]^2 = 1220 - 479 = 741^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

Определяем площадь бетона колонны, сохраняющего свою прочность в первый расчетный момент времени воздействия пожара $\tau_1 = 1,5$ ч (площадь сечения, ограниченная изотермой T_b^{cr}

Для тяжелого бетона на силикатном заполнителе $T_b^{cr} = 500^\circ\text{C}$.

Площадь сечения F , ограниченную на момент времени $\tau = \tau_1$ изотермой $T = T_b^{cr}$ при четырехстороннем тепловом воздействии на конструкции квадратного сечения ($h_1 = h_2 = h$) по режиму стандартного пожара, можно определить по формуле:

$$\begin{aligned}
F &= \psi \cdot (2 \cdot c)^2, \\
c &= \frac{h}{2} - \delta_c^{cr}, \\
\delta_c^{cr} &= r' \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}}, \\
r' &= 1 - \sqrt{\frac{1200w - 1220 + T_b^{cr}}{1220w}}, \\
w &= 1 - 2(1 - r)^2 \\
r &= (h/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l \quad (r \leq 1), \\
\psi &= \frac{b_0}{c} - 0,2, \text{ но более } 1. \\
b_0 &= \frac{h}{2} - \delta_{y2}
\end{aligned}$$

Определим значение параметра r :

$$r = (h/2 + \varphi_1 \cdot \sqrt{\alpha_{red}}) / l = (0,3/2 + 0,62 \cdot \sqrt{0,00132}) / 0,154 = 1,12$$

т.к. $r > 1$, то принимаем $r = 1$.

$$\text{Соответственно, } w = 1 - 2 \cdot (1 - r)^2 = 1 - 2 \cdot (1 - 1)^2 = 1$$

Определим значение параметра r' :

$$r' = 1 - \sqrt{\frac{1200w - 1220 + T_b^{cr}}{1220w}} = 1 - \sqrt{\frac{1200 \cdot 1 - 1220 + 500}{1220 \cdot 1}} = 1 - 0,627 = 0,373$$

Определяем значение толщины критически прогретого слоя бетона у середины прогреваемой поверхности:

$$\delta_c^{cr} = r' \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} = 0,373 \cdot 0,154 - 0,62 \cdot \sqrt{0,00132} = 0,057 - 0,023 = 0,0345 \text{ м}$$

Определяем значение c по формуле:

$$c = \frac{h}{2} - \delta_c^{cr} = \frac{0,3}{2} - 0,0345 = 0,15 - 0,0345 = 0,115 \text{ м}$$

Глубина прогрева внутри угла определяется по формуле:

$$\delta_{yz} = r_{yz} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}}, \text{ где}$$

$$r_{yz} = 1 - \sqrt{1 - \sqrt{\frac{1220 - T_b^{cr}}{1220}}}$$

Определим значение параметра r_{yz} :

$$r_{yz} = 1 - \sqrt{1 - \sqrt{\frac{1220 - 500}{1220}}} = 0,518$$

Определим δ_{yz} :

$$\delta_{yz} = r_{yz} \cdot l - \varphi_1 \sqrt{\alpha_{red}} = 0,518 \cdot 0,154 - 0,62 \cdot \sqrt{0,00132} = 0,057$$

м

Определим параметр b_0 :

$$b_0 = \frac{h}{2} - \delta_{yz} = \frac{0,3}{2} - 0,057 = 0,093 \text{ м}$$

Определяем значение поправки ψ :

$$\psi = \frac{b_0}{c} - 0,2 = \frac{0,093}{0,115} - 0,2 = 0,8 - 0,2 = 0,6 \text{ (должно быть } \psi \leq 1!)$$

Рабочая площадь сечения бетона на момент времени $\tau = \tau_1 = 1,5$ ч будет равна:

$$F = \psi \cdot (2 \cdot c)^2 = 0,6 \cdot (2 \cdot 0,115)^2 = 0,0317 \text{ м}^2$$

А сторона рабочего сечения, приведенного к квадратному (h_b) на момент времени

$\tau = \tau_1 = 1,5$ ч будет равна:

$$h_b(\tau = 1,5 \text{ ч}) = \sqrt{F} = \sqrt{0,0317} = 0,178 \text{ м}$$

2) Решаем прочностную задачу применительно к рассматриваемой конструкции – определяем несущую способность колонны в момент времени $\tau = \tau_1 = 1,5$ ч воздействия стандартного пожара.

Определяем значение коэффициента продольного изгиба колонны (φ) с учетом уменьшения рабочего сечения бетона колонны при воздействия пожара.

$$\frac{l}{h_b(\tau = 1,5 \text{ ч})} = \frac{3,6}{0,178} = 20,2, \text{ отсюда } \varphi = 0,81$$

Определяем значение коэффициента условий работы при пожаре $\gamma_{s,T}$ арматуры колонны при $\tau = \tau_1 = 1,5$ ч.

Согласно табл. 2.8 [1] для стали класса А-III (А400) имеем:

При $T_s(\tau = 1,5 \text{ ч}) = 745$ °С, $\gamma_{s,T} = 0,10$

Определяем несущую способность $P(\tau)$ колонны в момент времени воздействия пожара $\tau = \tau_1 = 1,5$ ч:

$$\begin{aligned} P(\tau_1) &= \varphi \cdot [R_{su} \cdot \gamma_{s,T} \cdot A_{s,tot} + R_{bu} \cdot F] = \\ &= 0,81 \cdot [433 \cdot 0,1 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} + 34,9 \cdot 0,0317] = 0,911980 \text{ МН} \\ P(\tau_1) &= 912 \text{ кН} \end{aligned}$$

Проверяем условие наступления предельного состояния колонны по признаку «R» - потере несущей способности на момент воздействия пожара $\tau = \tau_1 = 1,5$ ч по формуле:

$$P(\tau = \tau_1 = 1,5 \text{ ч}) < N_n = 1390 \text{ кН}$$

Условие выполняется, т.к. $912 \text{ кН} < 1390 \text{ кН}$.

Соответственно, предел огнестойкости рассматриваемой колонны по признаку «R» менее 1,5 часов.

Для определение значения предела огнестойкости необходимо принять второй расчетный интервал времени $\tau = \tau_2 = 1,0$ ч и повторить расчеты.

Значение «R» определить линейной экстраполяцией.

Список используемой литературы

1. ФЗ №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
2. СП 64.13330-2011 «Деревянные конструкции».
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий.- М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001.- 382с.

Учебное издание

Составители: Иванов Александр Анатольевич, Метлушин
Сергей Владимирович.

Оценка огнестойкости зданий и сооружений

Учебно-методическое пособие

Отпечатано в авторской редакции с оригинал-макета
заказчика

Подписано в печать Формат 60х84 1\16.

Печать офсетная. Усл.печ.л 6,51. Уч.-изд.л.6,1.

Тираж 30 экз. Заказ № _____

Издательство «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.